第 40 卷 第 2 期
2022 年 6 月

天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 40, No. 2
June., 2022

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2022.02.09

基于计算机视觉算法的低频射电干扰快速检测与分析研究

高文帅[1,2,3]，赵碧轩[1]，郭 铨[1]，洪晓瑜[1,2,3]

(1. 中国科学院 上海天文台，上海 200030； 2. 上海科技大学 物质科学与技术学院，上海 201210； 3. 中国科学院大学 天文与空间科学学院，北京 100049)

摘要： 射电干扰 (radio frequency interference, RFI) 会导致与科学目标相关的天文观测数据损失或质量下降，因此对其进行检测与消除是射电天文观测数据处理的重要步骤之一。低频射电干扰主要来源于人为活动和自然大气现象，如调频广播、航空通信、卫星通信、流星和闪电等。以新疆乌拉斯台的 21CMA (the 21 centimeter array) 单天线阵的高时间分辨率 (约 1 ms) 观测模式为基础开发出一套用于低频射电干扰快速检测与分析的算法软件。该软件利用信号频谱瀑布图作为输入，主要基于 Canny 边缘检测算法与 Hough 寻线算法来识别射电干扰信号。测试结果显示，该软件对参数依赖性低，输出结果准确率约在 90%，处理性能有望满足实时处理的需要。观测数据来自 2020 年 1 月象限仪流星雨期间进行的约 42 h 的观测，通过射电干扰检测与初步分析，结果显示在 74 ~ 110 MHz 频率范围内，检测到的低频射电干扰的主要来源很可能是流星余迹的反射信号。

关 键 词： 低频射电干扰；低频射电干涉阵；图像处理；计算机视觉算法

中图分类号： P161 **文献标识码：** A

1 引 言

对于低频射电望远镜 (工作频率低于 300 MHz) 来说，人类活动产生的无线电、广播电视、调频无线电传输、航空和卫星通信等信号都是主要的干扰源[1]。空间大气的一些物理过程也会引入射电干扰，比如大气对流层的散射引起广播和电视信号的反射[2]、大气波导效应导致的电磁信号的长距离传播[3]、电离层异常引起的低频无线电信号的反射[4]、流星余迹引起的散射[5]、闪电[6]等。如果把相应的物理过程作为科学目标，射电干扰就可能反映其物理

收稿日期： 2021-09-17； **修回日期：** 2022-01-07

资助项目： SKA 专项 (2020SKA0110100)；上海市国际合作伙伴项目“国际大科学工程SKA区域中心前期建设”(19590780200)；上海浦江人才计划(19PJ1410700)

通讯作者： 赵碧轩，zhaobixuan@shao.ac.cn

过程信息。

相对于天文信号而言，射电干扰信号往往会强至少 10 倍[7]，但持续时间通常相对较短。以 21CMA 为例，它的最佳工作频段是 70 ~ 200 MHz，主要科学目标是宇宙再电离信号的探测。宇宙再电离时期中性氢的信号强度在 $(1\times10^{-3}\sim0.1)$ K 的量级[8]。而我们实际观测到的信号中主导成分是银河系本身的低频辐射，其强度在 100 MHz 左右为 1 100 K，比宇宙再电离信号强 4 ~ 5 个数量级，而在这个频率范围内的射电干扰通常会比银河系辐射还要高 2 个量级[9]。因为有着较为明显的识别特征，在数据量不大的情况下，对数据中的射电干扰可以进行人工标注。本文中所使用的 21CMA 的单天线阵，虽然同时观测的只有一到两个天线阵，但是由于采用了较高的时间分辨率 (约 1 ms)，每个天线每秒能产生 32 MB 数据，24 h 观测将得到 2.76 TB 数据。21CMA 共有 81 个天线阵，如果全部投入观测每天生成 440 TB 的数据。这样的数据量明显超出目前望远镜后端所能承载的数据处理能力。因此在本实验中，我们仅使用两组天线持续观测了总共 42 h，得到 4.6 TB 数据。即便如此，通过人工识别这些观测数据中的 RFI 也已经是一个低效且不可持续的方法。另外人类活动产生的 RFI 信号带宽相对较窄，频率固定，有时带有明显调制结构；这些特点有助于我们证认低频射电干扰信号的具体来源。

天文界已有的一些射电干扰识别软件不完全适合目前的需求。如 VarThreshold，它不适合检测距离非常近、信号非常尖锐的射电干扰[10]；基于奇异值分解 (SVD) 的算法[11]在检测周期性的射电干扰时具有非常好的效果，但是难以检测随频率变化的射电干扰信号[10]；AOFlagger[12]是一套基于射电干扰信号的形态进行检测、标记并去除射电干扰的软件，此软件在设计时把检测与标注的准确性作为一个重要的考虑目标，因此在检测效率上有所妥协，AOFlagger 处理 10^6 个数据点需要 1 s 左右，而我们使用的单个天线阵采样 1 s 约有 8×10^6 个点，另外 AOFlagger 不支持 21CMA 单天线模块的数据模式。

本工作利用计算机视觉算法快速提取毫秒时间尺度上射电干扰源，整理观测数据中的 RFI 信号特征，后续可构建射电干扰源样本研究 RFI 产生物理机制。本文分为 4 部分：第 1 章介绍研究背景和意义；第 2 章介绍研究数据和软件框架；第 3 章给出本项工作的测试结果；第 4 章进行总结和讨论。

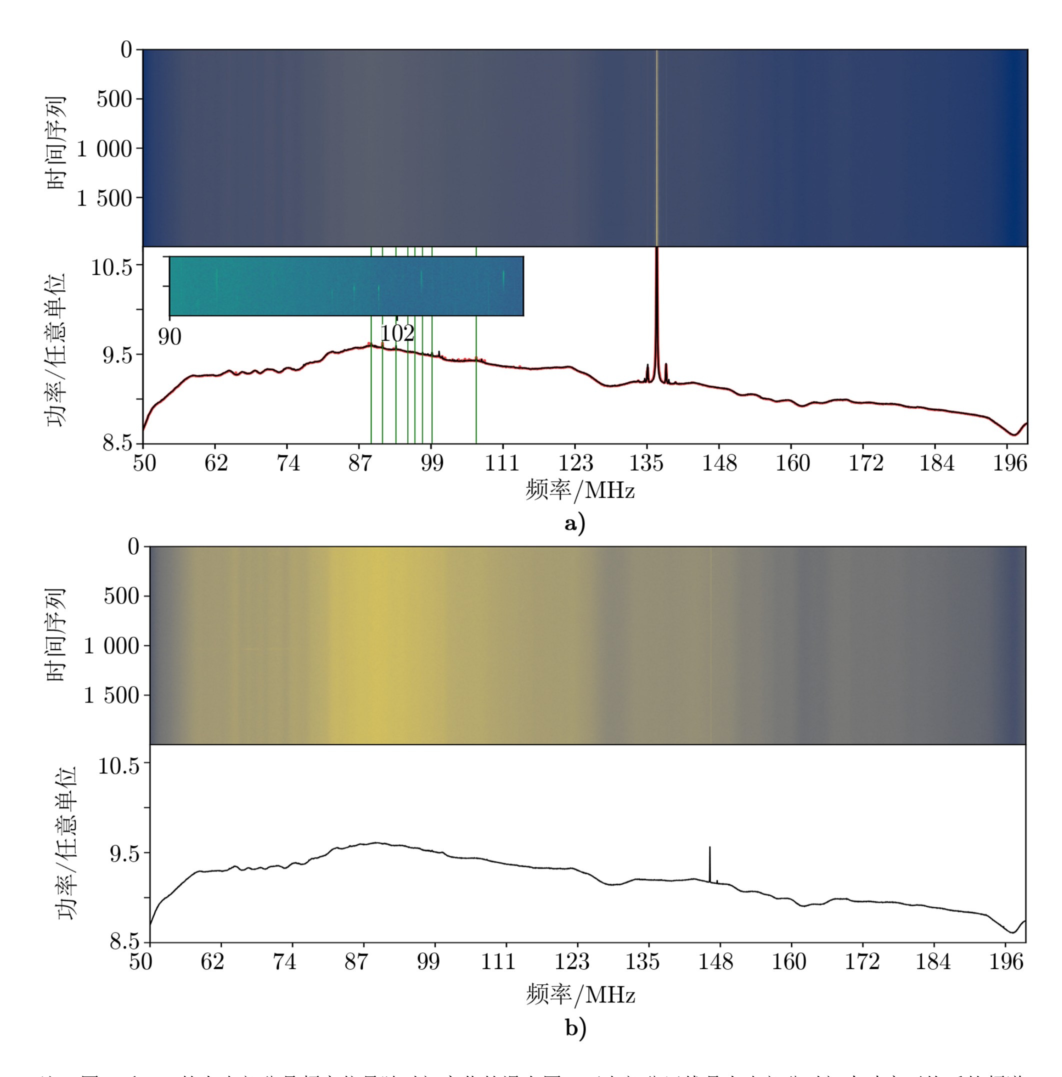
2　数据和软件框架

2.1　数据

本工作使用的数据来自 21CMA。21CMA 位于新疆乌拉斯台，台址海拔 2 650 m 以上，四周由海拔 3 000 m 以上的群山所环绕，可以作为天然屏障阻挡来自周边地区的电磁辐射。观测设备是 21CMA 中的 E5 (东边第 5 组) 和 E9 (东边第 9 组) 两个单天线阵，时间分辨率是 1 ms，频率范围是 50 ~ 200 MHz。观测时间是 2021 年 1 月 3、4、5 日，两单天线阵累计观测时间 42 h，总数据量 4.6 TB。数据格式为随时间变化的瀑布图 (频谱图)，横坐标为频率，单位是兆赫兹 (MHz)；纵坐标是时间，单位是毫秒 (ms)。实地测量表明，21CMA 站

址周围射电干扰主要来自低轨卫星数据传输 (137 MHz)、民航通讯 (121 MHz)，没有持续的调频广播的干扰，是低频射电天文观测的优良台址[13]。

图 1 展示了根据接收到的信号得到的频率随时间和功率分布的频谱图。



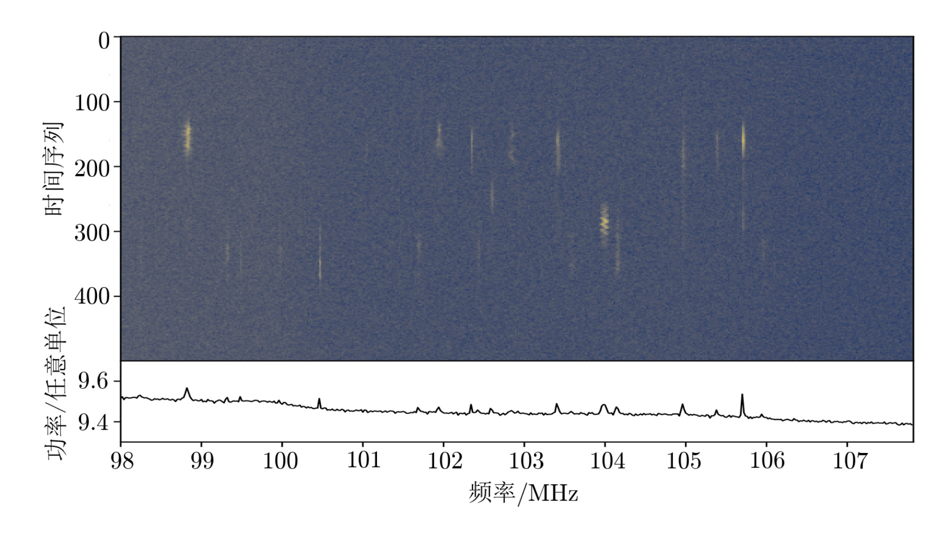
注：图 a)和 b) 的上半部分是频率信号随时间变化的瀑布图，下半部分黑线是上半部分时间内功率平均后的频谱分布图。图 a) 下半部分小图频率 87 ~ 111 MHz 之间出现了较弱的射电干扰，红线为小图的频谱图，绿直线为周边调频广播频段。

图 1 两个不同时刻，E9 天线阵接收到的信号功率随时间和频率分布图

图 1 a) 上半部分是人工目视发现的射电干扰信号，相应的 RFI 信号放大后显示在图 a) 下半部分内部。图 1 a) 下半部分黑线是所有 2 000 ms 信号功率的平均结果，红线是 250 ~ 500 ms 功率的平均结果，绿直线为地区调频广播的频率 (中央人民广播电台：88.7 MHz；维语台：90.6 MHz；新疆人民广播电台城市广播：92.9 MHz；新疆人民广播电台交通广播：

94.9 MHz；新疆人民广播电台新闻综合：96.1 MHz；乌鲁木齐交通广播：97.4 MHz；新闻音乐广播：99.0 MHz；旅游音乐广播：106.5 MHz)。这期间频率 87 ~ 111 MHz 之间出现了较弱的射电干扰，相应的射电干扰信号放在图 a) 下半部分内部，发现 137 MHz 处有强干扰信号。图 1 b) 未发现射电干扰信号，黑线为 2 000 ms 信号功率平均的结果，这期间频率 87 ~ 111 MHz 之间未出现图 1 a) 中的较弱射电干扰，但发现 144 MHz 处有强干扰信号，可能来自对讲机通信干扰。

图 2 为人工找到的低频射电干扰信号示例。为了找到有效检测射电干扰信号的方法，我们先对 30 min 的观测数据进行了人工目视检测，发现大部分数百毫秒或更长的突发射电干扰信号可能来自飞机、流星余迹或者其他原因散射的调频广播。这些信号的频率范围与调频广播的范围一致，并且由于调频广播是通过改变载频的瞬时频率来传输信息，所以通过信号的频率抖动可以很容易地把它们识别出来。



注：图中横坐标为观测频率，纵坐标分别为功率和时间。从上半部分图中可见低频射电干扰信号有规律频率的载频改变现象，因此可以被认定为被散射的调频广播信号，此信号持续时间约 300 ms。

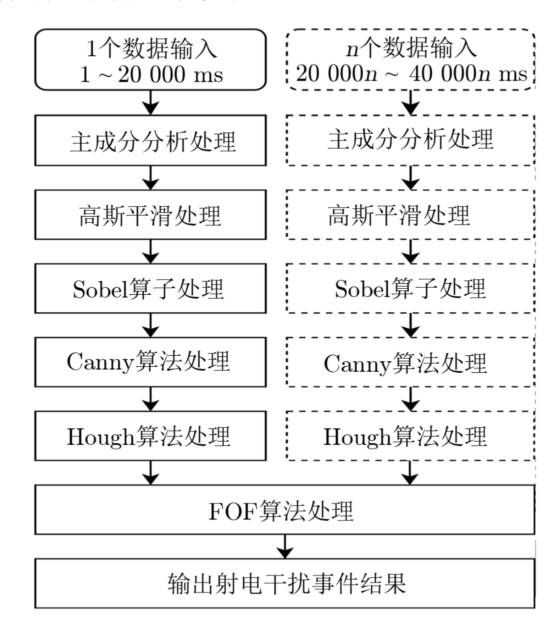
图 2 典型低频射电干扰信号示例图

2.2 软件框架描述

通过人工目视检测，我们发现大多数射电干扰在频率-时间图 (频率信号随时间变化的瀑布图) 中功率电平较高，因此我们尝试利用计算机视觉识别中常用的边缘检测和线段检测算法来提取信号，以 Canny 边缘检测算法[14] 与 Hough 寻线算法[15] 为核心算法进行射电干扰信号检测。

第一步，主成分分析处理。将频率信号随时间变化的瀑布图 (频率-时间图) 作为检测程序的输入数据，对输入数据先用主成分分析 (principal component analysis, PCA)[16] 的方法找到第一阶主要成分，第一阶主成分对应的是原始信号中的主要信号主导成分，其余高阶主成分对应着原始信号中的微扰成分。在本工作中，由于仪器噪声和环境温差等因素，通过人工目视相对功率大小，发现输入数据中整体信号强度并不稳定。射电干扰在输入数据中表现

为瞬时的微扰成分，而第一主成分对应的是频谱信号在较长时间尺度上的结构与变化。我们从原始输入信号中减去第一主成分后的信号，即扣除输入数据中较长时间尺度上的功率起伏，处理后的信号作为下一步的输入。第二步，高斯滤波函数作平滑处理。高斯滤波就是对整幅图像进行加权平均的过程。在输入数据中，一段干扰信号表示为一条线段，其强度变化表现为沿轴 X 或轴 Y 方向上一致的梯度变化，而小的随机起伏信号则是各向同性的，所以高斯滤波可以有效地抚平一些小的起伏，保留线段结构。第三步，引入 Sobel 算子对输入信号中的弱干扰信号进行加强。第四、第五步，利用 Canny 边缘检测和 Hough 寻线算法处理数据，得到用于提取射电干扰信号的有效参数。第六步，通过 FOF (friends of friends)[①]聚类查找算法找到射电干扰信号参数，按照时间、频率相关性组合成事件 (events)。通过统计某一事件中所有射电干扰信号持续时间，可以得到某一射电干扰事件发生的起止时间、频率范围和相对强度。检测程序的具体流程见图 3。



注：虚线流程代表同时输入多个数据实现的多线程数据处理。

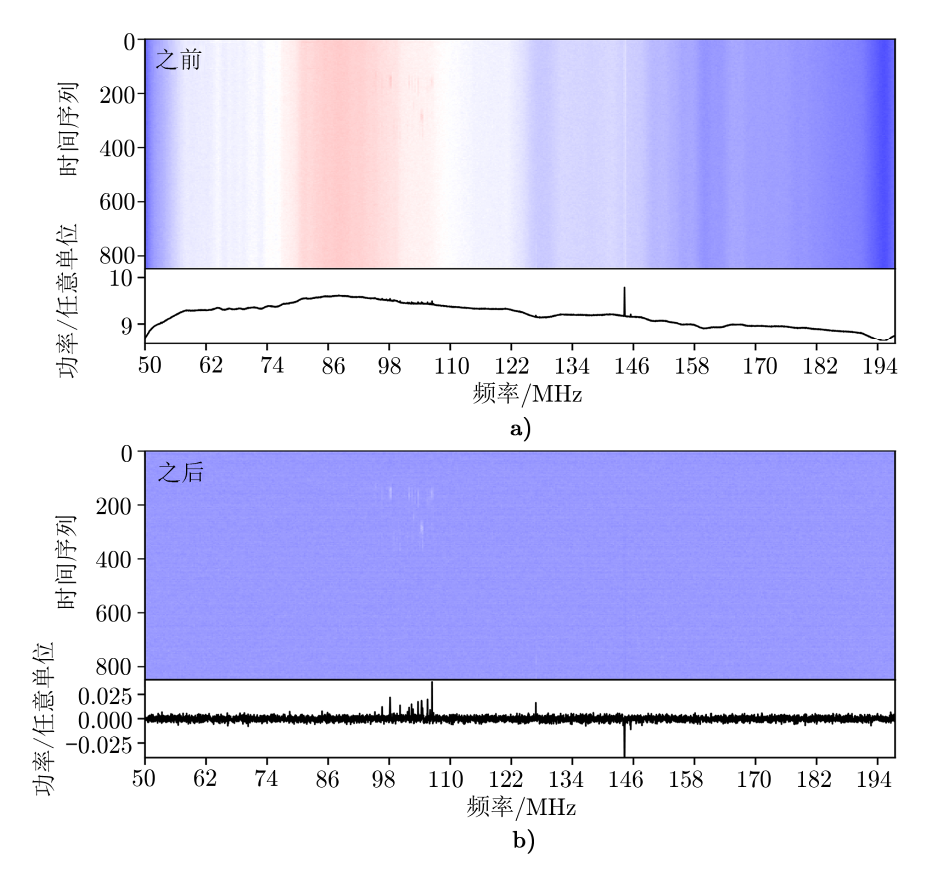
图 3 射电干扰检测流程示意图

2.2.1 主成分分析处理

主成分分析通过正交变换将输入的信号进行线性变换，从而投影为一系列线性无关成分的值，这些线性无关的成分称为主成分。一般来说其中第一主成分对应的是原始信号中的主要信号主导成分，高阶主成分对应着原始信号中的微扰成分。这一步处理有助于稳定后面 Canny 边缘检测算法与 Hough 寻线算法中参数的选择。数据处理中所用的主成分分析算法是基于奇异值分解的方法 (singular value decomposition, SVD)，我们对天线接收到的某段时间内的频谱 (也就是指定时间长度的瀑布图) 数据 $X(t,\nu)$ (其中 $t\in[t_0,t_1)$ 是信号到达时

[①]https://github.com/simongibbons/pyfof

刻，单位为 ms，$\nu \in [50, 200]$ 是频率，单位为 MHz) 进行奇异值分解(如图 4 所示)。



注：a) 显示的是主成分分析处理前的数据，b) 显示的是处理后的结果。原始数据中存在的随频率变化的系统底噪被扣除并作归一化处理，短时标的射电干扰信号仍然被保留了下来。

图 4　主成分分析处理效果示意图

2.2.2　高斯平滑滤波处理

高斯平滑滤波主要目的是抑制小尺度上随机出现的假信号。二维的高斯平滑滤波器中频率方向上的平滑宽度是 $sx = 5$ pixel，时间方向的平滑宽度是 $sy = 21$ pixel。为了尽量检测到稳定的射电干扰信号，所以在时间方向的平滑宽度，我们设为频率方向上的平滑宽度的 4 倍。如果需要看更加短时标的射电干扰，则需要降低时间方向的平滑尺度。测量结果表明，小幅变化两个平滑宽度对结果影响较小。

2.2.3　Sobel 算子处理

Sobel 算子由 Sobel 和 Feldman 两人于 1973 年提出[17]，其作用与 Canny 算法类似，是用于边缘检测的微分算子。通过利用两个 3×3 矩阵与输入图像卷积，得到图像轴 X、轴 Y 方向近似梯度。本文利用 Sobel 算子对图像进行预处理，将原始瀑布图转化成信号变化梯度图，作为之后 Canny 算法的输入。Sobel 算子的作用是强化信号，经过 Sobel 算子预处理后

的图像中射电干扰信号相对背景会更加显著，后续 Canny 算法处理时对参数的依赖性也会降低，因而整体结果将更加稳定 (如图 5 所示)。

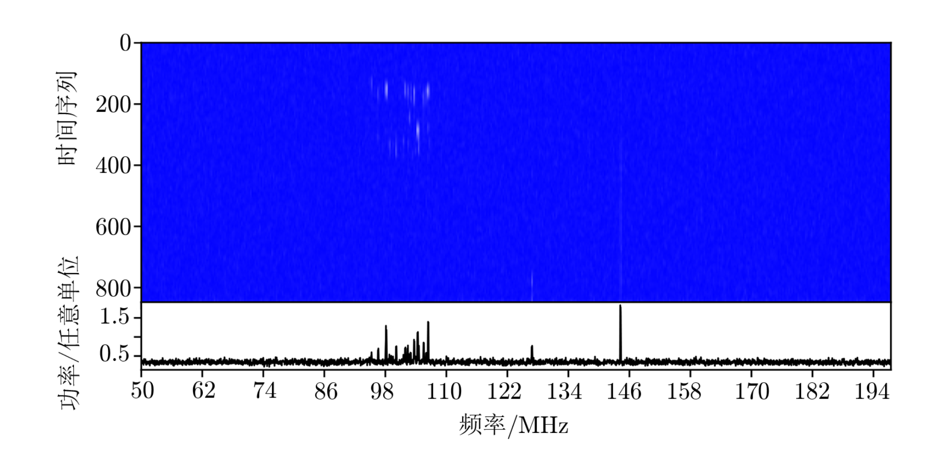


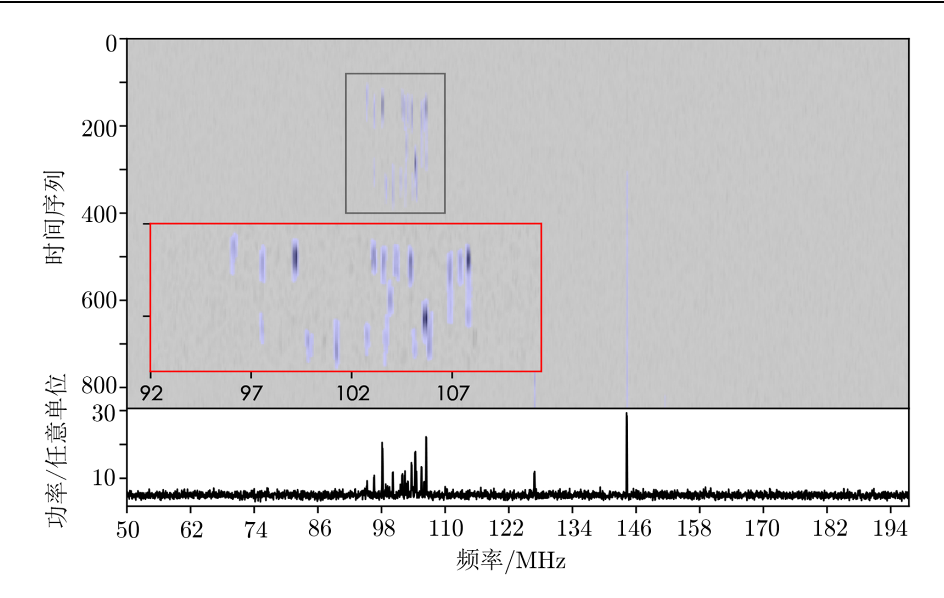
图 5 高斯平滑和 Sobel 算子处理后，射电干扰信号图案相对背景更为显著

2.2.4 Canny 算法处理

Canny 算法在高斯滤波的基础上利用一阶有限差分近似求取灰度值的梯度 (变化率)，在图像中梯度通常用来表示灰度值的变化程度和方向。而图像中的边缘通常就是灰度值变化最大的地方，所以通过将梯度与设定好的阈值进行比较就能检测出图像中的边缘。实际算法中使用两个阀值来确定边缘检测阈值，分别是 $Val_{\max}$ 和 $Val_{\min}$。其中大于 $Val_{\max}$ 的都被检测为边缘，而低于 $Val_{\min}$ 的都被检测为非边缘。对于中间的像素点，如果与确定为边缘的像素点邻接，则判定为边缘，否则为非边缘。在本工作中，$Val_{\min}$ 和 $Val_{\max}$ 分别设为 106 和 125。测量结果表明，经过前面预处理，$Val_{\min}$，$Val_{\max}$ 对最终结果，特别是事件总数的影响可以忽略不计 (参见图 6。详细测试参见 3.1 节)。

2.2.5 Hough 算法处理

瀑布图信号经过 Canny 算法处理后，可以得到射电干扰信号的边缘，但由于噪底不均匀等因素，很多情况下获得的射电干扰结构是不连续的，需要通过 Hough 算法将它们连接起来，得到一个较完整的射电干扰信号结构。Hough 算法通过将图像二维坐标空间变化到极坐标参数空间，把检测任意形状的问题转化为峰值统计的问题。我们借助 Hough 算法对 Canny 算法找到的射电干扰信号做几何意义上的识别，提取射电干扰信号的起始时间、所在频率及频率范围等相应的信息。Hough 算法有三个关键的参数：一个是 $threshold$，决定了算法在参数空间认定一条直线最小需要找到多少个参数空间的交点，低于此数的线段不被认为是信号；另一个是 $length_{\text{min_line}}$，决定了最小信号的长度；还有一个 $gap_{\text{max_line}}$，如果两条线之间的间隔小于此数，则认为这二条线段是连续的。最后一个参数对射电干扰事件的影响较小，因为它只改变找到的信号长度和数量，将短信号连成一条长的，而不会产生新的信号，所以后续参数收敛测试没有把它纳入考虑 (见图 6)。



注：蓝色半透明线表示的是 Hough 算法最后找到的射电干扰信号，信号较为集中的区域 (细方框内的区域) 放大显示在左下角红色方框内。

图 6　Canny 和 Hough 算法处理后找到的射电干扰信号示意图

2.2.6　FOF 分类处理

从人工检测的结果可以看出，射电干扰信号大多都是成组出现的，在时间和频率上有相关性。前面几步的射电干扰处理步骤，只能检测单独射电干扰信号结构，无法处理射电干扰信号在时间或频率上的相关性。因此我们引入 FOF 的分类搜寻算法，将 Hough 算法找到的射电干扰信号的起止时间和发生频率作为输入，将时间与频率都相关的射电干扰信号群定义为一个事件，最后得到了一系列的射电干扰事件。这些事件及它们的性质将会被用于后续的射电干扰信号相关物理过程的研究。时间相关性可以用 FOF 算法中的链接参数 b 来衡量：参数值越大、时间间隔更远的信号会被认为是同一事件；参数值越小，同一事件可能被分割成两个相距较近的不同事件。经过测量发现 $b = 500$ 是一个较为合适参数，这个值的上下浮动，对最后事件的总数影响较小 (参见 3.1 节)。

根据电脑处理性能，本工作把连续观测数据分割成时长为 2×10^4 ms 的片断，在每个片断运行前 5 步，最后通过 FOF 算法得到射电干扰事件集合。

3　测试与结果

3.1　程序结果的稳定性

本射电干扰检测与分析算法软件综合多个算法，每个算法均有若干参数，因此需要选择合适参数集合。我们检测的主要目标是时长为几十至几百毫秒级别的射电干扰信号。希望输出的结果满足两个指标：第一是尽可能不漏掉射电干扰信号，用找到的信号事件 (q) 占输

入数据中所有信号事件 (n) 的百分比 (q/n) 来衡量；第二是找到的射电干扰信号要准确，在复杂射电环境中真实射电干扰 (找到的信号减去虚假信号 (f) 即 $q-f$) 信号占全部找到信号 (q) 的百分比，即 $(q-f)/q$。以上两个指标 (百分比) 越高，说明所选的参数越合适。针对具体的科学研究目标，通过微调参数集合对不同强度 RFI 信号进行提取。

首先，我们人工检查了约 0.5 h 的数据，以比较程序找到的射电干扰信号和人工识别的差别。经过人工对比确认，发现使用默认参数集合的检测程序输出结果的准确率为 90% 左右。表 1 中加粗显示了目前的默认参数集，以此为基础，每次改变一个重要参数，然后比较找到的射电干扰事件的结果。结果显示，我们的检测与分析算法软件输出比较稳定，在不同参数选择下，最终结果的变化稳定在 10% 以内。其中影响最大的参数是 $length_{\rm min_line}$，它决定了程序找到最小信号的长度，其值的增长会导致找到短时标的射电干扰信号的数量下降，经过仔细对比，确认 $length_{\rm min_line}$ 仅影响一些暗弱的射电干扰事件。

表 1　程序参数选择情况

参数	参数值	事件	事件变化幅度
	86	249	4
$val_{\rm min}$	**106**	**239**	
	124	223	7
	107	228	5
$val_{\rm max}$	**125**	**239**	
	145	235	2
	10	**239**	
$threshold$	20	234	4
	30	228	5
	15	258	8
$length_{\rm min_line}$	**25**	**239**	
	35	214	10
	300	227	5
b	**500**	**239**	
	700	234	2

注：参数 1, 2 为 Canny 算法的参数，参数 3, 4 是 Hough 算法所用的参数，参数 5 是 FOF 分类处理中的参数。事件是我们用约前 1 000 s 的数据，根据不同参数分别找到的信号事件数量。最后一列是取不同参数时相对默认事件的变化幅度。检测与分析框架的默认参数为：$val_{\rm min}=106$，$val_{\rm max}=125$，$threshold=10$，$length_{\rm min_line}=25$，$b=500$。

本工作的主要目的是初步检测与分析射电干扰信号，因此主要关注对结构清晰的射电干扰信号的检测是否成功，对暗弱射电干扰搜寻的优化问题暂时没有考虑。

3.2　程序性能

整套程序框架由 Python 语言编写，除了主成分分析处理，其他步骤都是单线程工作。观测数据存储在以 10 Gb·s^{-1} 相连的网络存储服务器上，程序运行时数据读入的

速度约为 1.45 Gb·s^{-1}，远没有达到 10 GB 网络带宽。通过程序计时，可得前 5 个步骤 (PCA、高斯平滑、Sobel 算子处理、Canny 算法处理、Hough 算法处理) 的耗时比例为 4.3:0.22:0.25:0.33:0.09。目前检测程序处理 1 000 s 的观测总共需要约 472 s，所用时间小于观测数据本身的时长，符合框架算法验证阶段目标，可以实时处理观测数据。

3.3　检测结果分析

本节展示程序输出结果并分析。图 7 是经过框架输出的结果，是射电干扰事件的典型例子。我们找到一些持续时间约数十秒甚至更长的调频广播信号。如图 8 所示的事件甲、乙、丙，事件甲和事件乙持续的时间约为 100 ~ 200 ms 左右，同时发现事件甲在调频广播频段信号频率覆盖比长时间持续信号多，且存在于 80 MHz 以下频段，事件乙在调频广播频段信号频率覆盖与长时间持续信号相近，很可能两个事件发生的地点相关性比较高，后续可利用这些相关性以及不同天线阵观测的时间相关性来确定事件发生的空间位置。

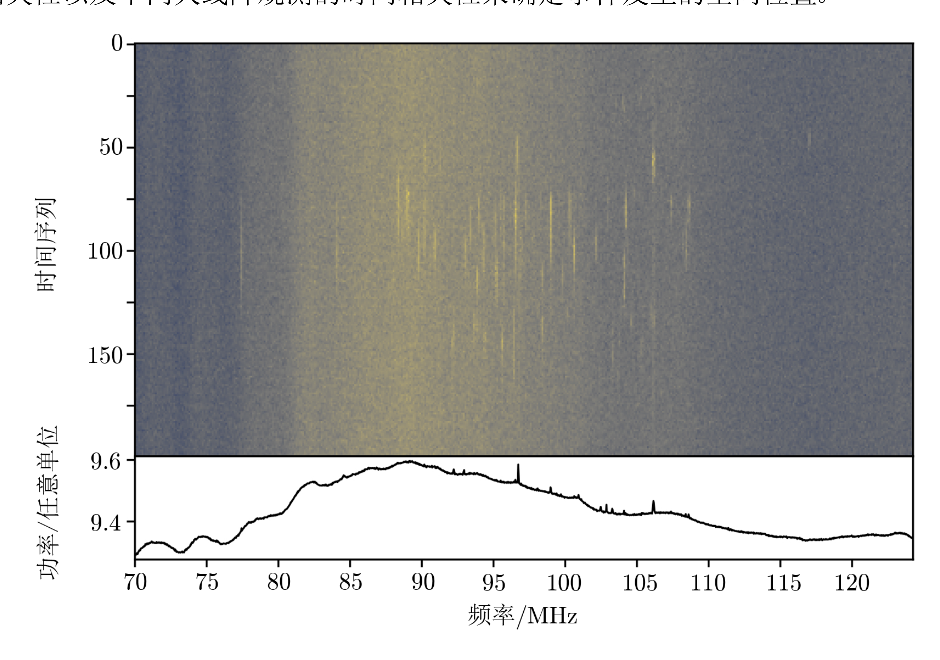
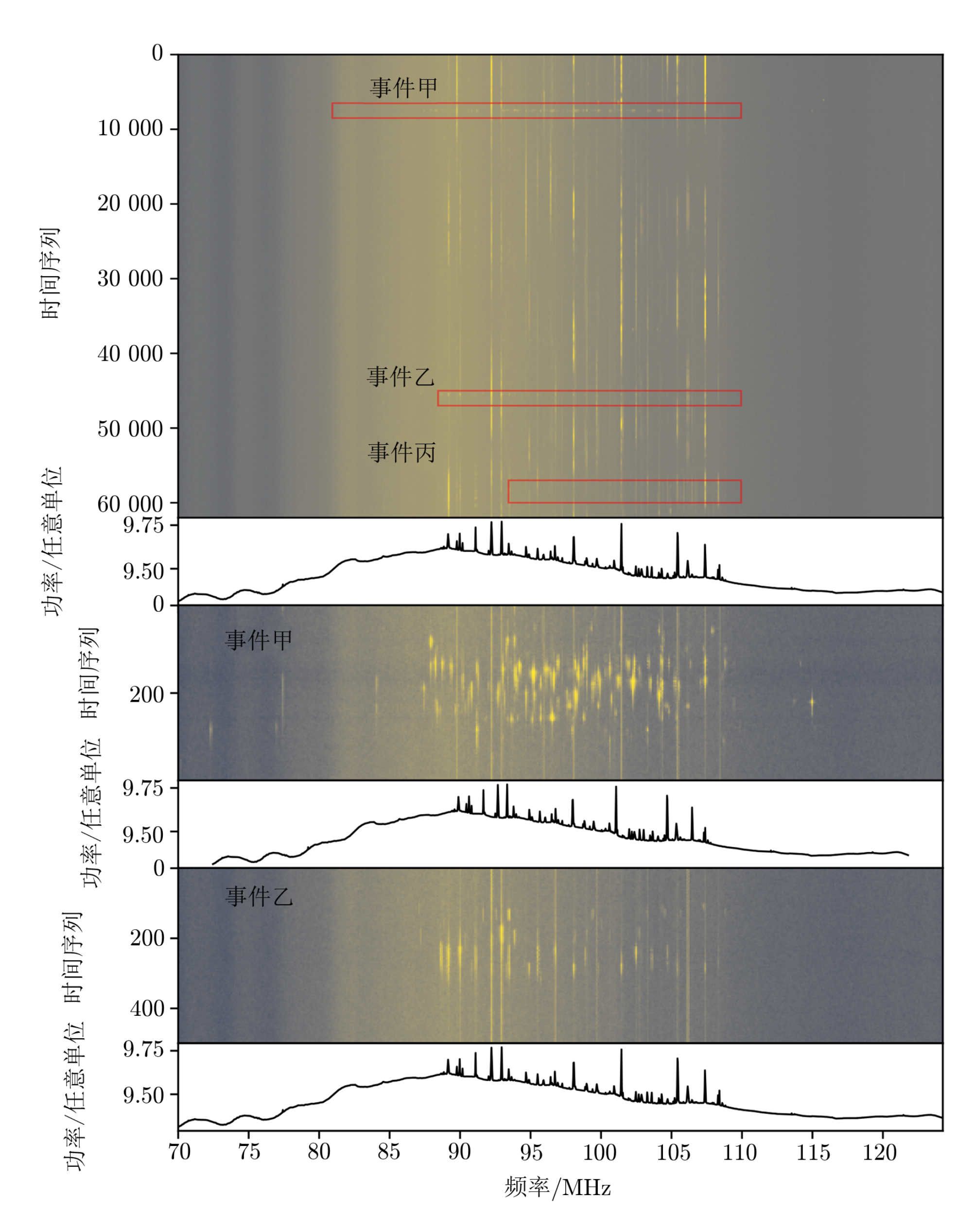


图 7　经典单个射电干扰事件示例图

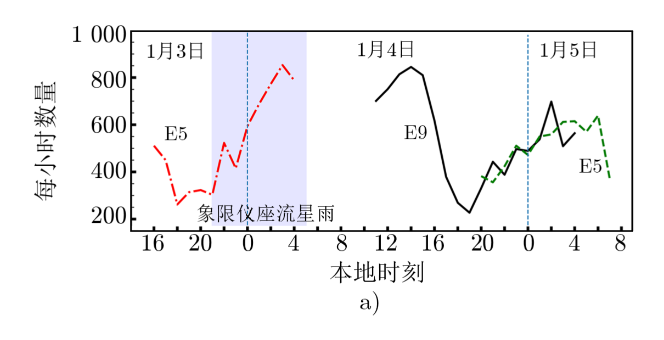
飞行器和流星余迹都能前向散射调频广播信号。为了验证我们所检测到的射电干扰信号是否主要是由流星余迹反射引起的，我们于 2021 年 1 月 3 日特意选取象限仪流星雨爆发期间进行了观测，统计了测到的射电干扰信号随时间变化的结果 (如图 9 所示)。我们发现，检测到的射电干扰数目有周天变化，具体表现为凌晨 5 时左右信号少，傍晚 18 时左右信号多，两时段信号数量比约为 1:3，这与地球大气与流星体碰撞概率理论预测吻合[18, 19]。地球上流星发生的数目，由于地球自转和公转的运动，使得一天之中太阳升起的时候，地面观测到的流星数目更多 (流星与地球白昼面迎面相碰)，傍晚时刻观测到的数目较少 (只能观测到追上地球的流星)[19−21]。相较于其他时间段，在 1 月 3 日 22 时开始至次日凌晨 4 时期间，射电干扰信号的计数有一个明显的增加趋势 (参见图 9 b))，因此，观测到的射电干扰信号事件



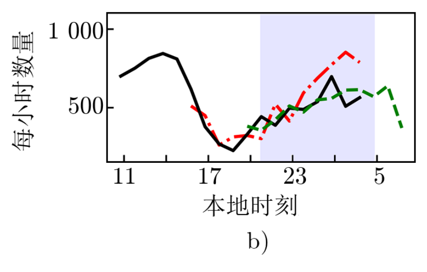
注：在观测数据中有少数持续时间较长的信号 (约 60 s)，在它的上面还叠加了三个额外的事件：甲、乙、丙。事件甲和乙放大后显示在图中间和下面部分。

图 8 混合射电干扰事件示例图

可能来自流星轨迹引起的调频广播前向散射。



a)



b)

注：a) 42 h 观测数据检测到的射电干扰事件计数随时间变化图。其中红色点划线和绿色虚线是 E5 天线分别于 1 月 3 日和 1 月 4 日观测约 12 h 的结果，黑实线是 E9 天线 16 h 观测的结果。淡紫色的阴影标注了 2021 年象限仪座流星雨峰值的大致时间。E5 天线因故在 1 月 4 日白天没有观测数据。b) 展示的是 1 月 3 日晚与 1 月 4 晚的射电干扰事件计数按相同时刻对齐后的比较结果。1 月 3 日晚象限仪座流星雨发生时，射电干扰计数明显高于 1 月 4 日晚上的 E5 和 E9 的计数。

图 9 检测到的射电干扰信号数量随时间的变化图

4 总结与讨论

为快速提取毫秒时间尺度上射频干扰源，整理观测数据中的 RFI 信号特征，我们开发了一套 RFI 信号的快速检测与分析算法软件。软件框架主要基于计算机视觉的 Canny 算法、Hough 寻线算法和主成分分析算法，最后由 FOF 算法把射电干扰信号按时间和频率的相关性分组。经初步验证，计算机算法处理效率较高，软件对参数选择的依赖性较低，检测到的 RFI 一致性较好，能够降低系统变化引起的 RFI 检出数量的不确定性，满足本工作初步要求。

本工作后续可以进一步优化参数，提高暗弱射电信号检测能力，如用模拟信号数据优化参数，把输出结果作为机器学习的输入数据，引入机器学习提升 RFI 检测能力。同时，参考其他射电干扰软件方法，比较优缺点，持续提高射电干扰检测的效率和准确度。

通过射电天文望远镜接收流星余迹的反射来观测流星已经是一种较为成熟的流星观测方法，在国外已经有成熟的射电流星监测网 (例如 BRAMS①)。与光学方法相比，射电望远镜的观测不受光照的影响，对天气的依赖性低，且更容易观测到暗弱的流星。对流星的观测可帮助我们研究彗星粒子轨道的性质，也有助于研究太阳系的内部结构等。本工作将流星的观测方法与之前常用的射电观测流星的方法进行对比，不同之处在于，我们的观测不需要发射机发出信号照亮流星余迹，而使用周边调频广播的信号当作“发射机”。今后如果有一个较为完备的站址周边的调频广播的信息库，包括发射频率和位置，那么通过接收到的反射信号之间的时延，可以得到射电干扰事件的距离和方向信息。除流星余迹的反射，对流层散射、大气波导现象、零星的电离层异常、闪电等大气层内的物理现象都会产生射电干扰信

①https://brams.aeronomy.be

号，有时这些信号的功率会非常高，完全破坏低频射电阵所在的安静电磁环境。记录显示，2021 年 7 月，21CMA 接收到大量高强度的调频广播信号，这些干扰持续时间从几小时到半天不等，晚上即消失，内容包括英语、俄语等内容，经过持续排查，基本排除人为干扰可能。这种临时或季节性的干扰很可能与大气波导现象有关，持续的监测数据将非常有助于研究这些干扰背后的物理机制。

参考文献：

[1] 劳保强, 安涛, 陈骁, 等. 天文学报, 2017, 5: 110
[2] Weiss A J, Friedlander B. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1993, 41: 7
[3] 王向敏. 硕士论文. 南京: 南京信息工程大学, 2007: 72
[4] Davies K. Ionospheric Radio. London: Peter Peregrinus Ltd,1990: 312
[5] 王伟. 无线电通信技术, 2007, 33(2): 55
[6] Rison W, Krehbiel P R, Stock M G, et al. Nature Communications, 2016, 7: 10721
[7] Ciardi B, Labropoulos P, Maselli A, et al. MNRAS, 2013, 2: 1755
[8] Pritchard J R, Loeb A. Physical Review D, 2010, 82: 023006
[9] Huang Y, Wu X P, Zheng Q, et al. RAA, 2016, 16(2): 36
[10] Offringa A R, de Bruyn A G, Zaroubi S, et al. MNRAS, 2010, 405: 155
[11] Ue-Li Pen, Lister S, Jeffrey B P, et al. MNRAS, 2009, 394(1): L6
[12] Offringa A R, van de Gronde J J, Roerdink J B T M. A&A, 2012, 539: A95
[13] Zheng Q, Wu X P, Johnston-Hollitt M, et al. ApJ，2016, 832(2): 190
[14] Hossain F, Kumar P K M, Abu Yousf M. International Journal of Computer Applications, 2015, 124: 9
[15] Patel R, Pant V, Iyer P, et al. Solar Physics, 2021, 296: 2
[16] Contopanagos H, Zhang L, Alexopoulos N G. IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques, 1998, 46(11): 1936
[17] Sobel I, Feldman G. Pattern Classification and Scene Analysis. New York: Wiley, 1973: 271
[18] Meers M O, Glenn S, Elizabeth B, et al. Geophysical Research letters, 2008, 35: L03102
[19] 李赞, 刘增基, 沈健. 流星余迹通信理论与应用. 北京: 电子工业出版社, 2011: 34
[20] Kaufmann W. The Journal of the International Meteor Organization. 2017, 45: 4
[21] Peter D, Dorotovic I, Marian V. Proceedings of the International Meteor Conference.Rault J L, Roggemans P. Giron: International Meteor Organization, 2014: 207

Study of Fast Detection Algorithm of Radio Low-frequency Interference Based on Computer Vision

GAO Wen-shuai[1,2,3], ZHAO Bi-xuan[1], Guo Quan[1], Hong Xiao-yu[1,2,3]

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. School of Physical Science and Technology, Shanghai Tech University, Shanghai 201210, China; 3. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Radio Frequency Interference (RFI) can cause losing or degrading of astronomical observational data. Therefore, one of the key step in processing the radio observational data

is the detection and mitigation of RFI. The RFI in low frequency radio band not only can be introduced by the human activities or natural phenomenon in the atmosphere, such as FM broadcasting, aviation communication, satellite communication, meteor, lightning, etc. This work designs a pipeline based on computer vision algorithms for detecting and analyzing the low frequency RFI received by signal antenna pod of the 21 Centimeter Array. The pipeline, with the waterfall of received signals as input, and the pipeline identifies RFI primarily based on the canny algorithm and hough algorithm. The test results show that the pipeline is not sensitive to the changing of parameter, and the accuracy of the output is about 90%. The performance of the pipeline is able to meet the requirement of real-time RFI detection of the data. The principle of the method, the performance and the outcome of the pipeline are shown in the paper. We test our pipeline on the observation of 42 hours made in Janary of 2021. By the factor that the number counts of RFI events found by the pipeline varying with time and frequency, we infer that the major of the short RFI within the frequency range 74 $\sim$ 110 MHz are the results of remote FM radio signals forward scattered by the meteor trails.

Key words: radio low-frequency interference; low-frequency radio interferometer; image processing; computer vision algorithm